

Spis treści

Od Autora	11
Wykaz ważniejszych skrótów	15
Wykaz ważniejszych oznaczeń	19
Wykaz ważniejszych oznaczeń na rysunkach	21
1. Od telegrafu do terabitów	25
1.1. Rys historyczny	25
1.2. Czas telegrafu i telefonu	26
1.3. Światłowod na scenie	29
1.4. Budujemy infosferę	33
1.5. Kierunki rozwoju	36
Bibliografia rozdziału 1	37
2. Światłowody i elementy optyczne	39
2.1. Wprowadzenie	39
2.2. Światłowody kwarcowe	40
2.2.1. <i>Struktura światłowodu</i>	40
2.2.2. <i>Światłowody wielo- i jednomodowe</i>	42
2.2.3. <i>Tłumienie światłowodu</i>	45
2.2.4. <i>Dyspersja modowa</i>	46
2.3. Właściwości światłowodu jednomodowego	49
2.3.1. <i>Pole EM propagowanego modu</i>	49
2.3.2. <i>Prędkości fazowa i grupowa</i>	50
2.3.3. <i>Dyspersja materiałowa kwarcu</i>	52
2.3.4. <i>Dyspersja chromatyczna światłowodu jednomodowego</i>	53
2.3.5. <i>Dyspersja i kontrola polaryzacji</i>	56
2.3.6. <i>Efekty nieliniowe w światłowodzie</i>	59
2.4. Inne rodzaje światłowodów	61
2.4.1. <i>Światłowody planarne</i>	61
2.4.2. <i>Światłowody plastikowe</i>	64
2.4.3. <i>Światłowody z kryształów fotonicznych</i>	66
2.5. Elementy torów optycznych	67
2.5.1. <i>Dzielniki mocy optycznej</i>	67
2.5.2. <i>Optyczne sprzęgacze kierunkowe</i>	68
2.5.3. <i>Światłowodowe siatki Bragga</i>	72
2.5.4. <i>Izolatory i cyrkulatory optyczne</i>	78
2.6. Kable i łączenie światłowodów	81
2.7. Podsumowanie	85
Bibliografia rozdziału 2	85
3. Lasery telekomunikacyjne	87
3.1. Wprowadzenie	87
3.2. Wiadomości podstawowe	87
3.2.1. <i>Elementy lasera</i>	87

3.2.2. <i>Pobudzenie i emisja</i>	88
3.2.3. <i>Warunek akcji laserowej</i>	91
3.3. <i>Diody świecące typu LED</i>	92
3.3.1. <i>Złącze p-n</i>	92
3.3.2. <i>Heterozłącze P-n-N</i>	93
3.3.3. <i>Charakterystyki diody LED</i>	96
3.4. <i>Półprzewodnikowe lasery diodowe</i>	98
3.4.1. <i>Budowa diodowego lasera półprzewodnikowego</i>	98
3.4.2. <i>Lasery z rezonatorem Fabry'ego-Perota</i>	99
3.4.3. <i>Lasery wykorzystujące siatki (filtry) Bragga</i>	101
3.4.4. <i>Lasery o emisji powierzchniowej</i>	104
3.4.5. <i>Lasery z rezonatorem zewnętrznym</i>	105
3.4.6. <i>Lasery przestrajane</i>	105
3.4.7. <i>Lasery światłowodowe</i>	108
3.5. <i>Charakterystyki laserów diodowych</i>	109
3.5.1. <i>Równania dynamiki lasera diodowego</i>	109
3.5.2. <i>Podstawowe charakterystyki lasera diodowego</i>	111
3.5.3. <i>Dioda laserowa jako element obwodu</i>	113
3.5.4. <i>Charakterystyki modulacji lasera diodowego</i>	114
3.6. <i>Nadajnik optyczny</i>	114
3.6.1. <i>Układy sterowania prądem lasera</i>	114
3.6.2. <i>Nadajnik z laserem diodowym</i>	115
3.7. <i>Podsumowanie</i>	116
Bibliografia rozdziału 3	117
4. Fotodetektory i odbiorniki optyczne	119
4.1. <i>Wprowadzenie</i>	119
4.2. <i>Wiadomości podstawowe</i>	120
4.2.1. <i>Absorpcja fotonów i efekt fotoelektryczny</i>	120
4.2.2. <i>Wydajność kwantowa i czułość fotodetektora</i>	122
4.3. <i>Fotodetektory komunikacji optycznej</i>	123
4.3.1. <i>Fotorezystory</i>	123
4.3.2. <i>Fotodiody p-n</i>	124
4.3.3. <i>Fotodiody p-i-n</i>	125
4.3.4. <i>Pasmo pracy fotodiody p-i-n</i>	128
4.3.5. <i>Fotodiody p-i-n z falą bieżącą</i>	130
4.3.6. <i>Fotodiody lawinowe</i>	132
4.3.7. <i>Fotodiody z barierą Schottky'ego</i>	133
4.3.8. <i>Fototranzystory</i>	134
4.3.9. <i>Porównanie fotodetektorów</i>	135
4.4. <i>Odbiorniki optyczne z detekcją bezpośrednią</i>	136
4.4.1. <i>Obwodowe parametry fotodiody p-i-n</i>	136
4.4.2. <i>Wzmacniacze współpracujące z fotodiodą p-i-n</i>	138
4.4.3. <i>Szumy odbiorników optycznych</i>	139
4.5. <i>Detekcja koherentna</i>	143
4.5.1. <i>Detekcja w obecności dwóch sygnałów</i>	143
4.5.2. <i>Produkty detekcji heterodynowej i homodynowej</i>	144

4.5.3. Stosunek sygnału do szumu	146
przy detekcji heterodynowej i homodynowej	
4.6. Podsumowanie	146
Bibliografia rozdziału 4	147
5. Wzmacniacze sygnałów optycznych	149
5.1. Wprowadzenie	149
5.2. Wiadomości podstawowe	150
5.2.1. Klasyfikacja wzmacniaczy optycznych	150
5.2.2. Trzy główne typy zastosowań wzmacniaczy optycznych	151
5.2.3. Podstawowe parametry wzmacniaczy optycznych	151
5.3. Wzmacniacze półprzewodnikowe	155
5.3.1. Wzmacniacze półprzewodnikowe z rezonatorem	155
5.3.2. Wzmacniacze półprzewodnikowe z falą bieżącą	158
5.4. Wzmacniacze światłowodowe EDFA	159
5.4.1. Światłowod domieszkowany erbem	159
5.4.2. Układ i charakterystyki wzmacniacza EDFA	160
5.4.3. Wzmacniacze z innymi pierwiastkami ziem rzadkich	163
5.5. Światłowodowe wzmacniacze Ramana	164
5.5.1. Efekt wymuszonego rozpraszania Ramana	164
5.5.2. Układ wzmacniacza Ramana	165
5.6. Podsumowanie	169
Bibliografia rozdziału 5	170
6. Modulatory sygnałów optycznych	173
6.1. Wprowadzenie	173
6.2. Wiadomości podstawowe	173
6.2.1. Podstawowe definicje	173
6.2.2. Analogowa modulacja amplitudy	174
6.2.3. Analogowa modulacja częstotliwości	177
6.2.4. Analogowa modulacja fazy	180
6.2.5. Modulacje impulsowe	181
6.3. Bezpośrednia modulacja lasera	183
6.3.1. Modulacja mocy optycznej lasera	183
6.3.2. Czułość modulacji mocy lasera	185
6.3.3. Szumy i czystość widmowa sygnału lasera	187
6.4. Modulatory elektrooptyczne	189
6.4.1. Efekt elektrooptyczny	189
6.4.2. Modulator fazy	190
6.4.3. Sprzęgacz jako modulator amplitudy	192
6.4.4. Interferometr Macha-Zehndera – zasada działania	195
6.4.5. Modulator Macha-Zehndera – przykłady rozwiązań	200
6.4.6. Modulator z przestrajającym rezonatorem pierścieniowym	203
6.5. Inne rodzaje modulatorów	205
6.5.1. Modulatory elektroabsorpcyjne	205
6.5.2. Modulatory elektroakustyczne	206
6.6. Podsumowanie	207
Bibliografia rozdziału 6	208

7. Analogowe łącza optyczne z detekcją bezpośrednią	211
7.1. Wprowadzenie	211
7.2. łącza analogowe z modulacją amplitudy i detekcją bezpośrednią	213
7.2.1. łącze z bezpośrednią modulacją mocy optycznej	213
7.2.2. Wzmocnienie łącza analogowego z modulacją bezpośrednią	216
7.2.3. łącze z zewnętrzną modulacją mocy optycznej	219
7.2.4. Wzmocnienie łącza analogowego z modulacją zewnętrzną	222
7.3. Charakterystyka optycznych łącz analogowych	223
7.3.1. O doborze punktu pracy modulatora M-Z	223
7.3.2. Transmisja światłowodem zmodulowanego sygnału optycznego	226
7.3.3. Modulacje jednowęstęgowe i z wytłumieniem nośnej	229
7.4. Szumy i zniekształcenia w optycznych łączach analogowych	232
7.4.1. Szumy w optycznych łączach analogowych	232
7.4.2. Zniekształcenia intermodulacyjne w łączach analogowych	237
7.4.3. Linearyzacja charakterystyk modulacji	240
7.5. Podsumowanie	242
Bibliografia rozdziału 7	243
8. Macierz rozproszenia w łączu optycznym	245
8.1. Uwagi o macierzy rozproszenia	245
8.2. Macierz rozproszenia obwodów mikrofalowych	246
8.2.1. Założenia	246
8.2.2. Definicja macierzy rozproszenia	248
8.2.3. Własności macierzy rozproszenia	248
8.2.4. Macierz rozproszenia wielowrotnika	250
8.2.5. Macierz transmisyjna	251
8.2.6. Macierz rozproszenia mieszacza mikrofalowego	252
8.3. Macierz rozproszenia w obwodach łącza optycznego	255
8.3.1. Zasady ogólne	255
8.3.2. Macierz rozproszenia lasera modulowanego bezpośrednio	257
8.3.3. Macierz rozproszenia nadajnika z modulatorem M-Z	260
8.3.4. Macierz rozproszenia fotodetektora	261
8.3.5. Macierz rozproszenia światłowodu	263
8.4. Macierz rozproszenia w przewodnicach optycznych	266
8.4.1. Fala na granicy dwóch ośrodków	266
8.4.2. Rezonator Fabry'ego-Perota w torze optycznym	267
8.4.3. Interferometr Macha-Zehndera	269
8.5. Podsumowanie	271
Bibliografia rozdziału 8	272
9. Analogowe łącza optyczne z detekcją koherentną	275
9.1. Wprowadzenie	275
9.2. Odbiorniki koherentne	276
9.2.1. Podstawowy układ odbiornika z detektorem koherentnym	276
9.2.2. Odbiornik koherentny z podwójnym fotodetektorem zrównoważonym	278
9.2.3. Odbiornik koherentny sygnału spolaryzowanego	281
9.2.4. Detektor koherentny ze sprzęgaczem 3 x 3	283
9.2.5. Stabilizacja częstotliwości heterodyny w odbiornikach koherentnych	284

9.3. Nadajniki łączy z detektorem koherentnym	286
9.3.1. Nadajnik z modulacją fazy	286
9.3.2. Nadajnik z modulacją amplitudy i fazy	287
9.4. Systemy transmisyjne z detekcją homodynową	289
9.4.1. Właściwości detektora homodynowego	289
9.4.2. Łącze optyczne z detekcją homodynową	290
9.5. Łącza optyczne z modulacją fazy	291
9.5.1. Łącze optyczne z modulacją fazy i detekcją koherentną	291
9.5.2. Łącze optyczne z modulacją fazy i interferometrem Macha-Zehndera	292
9.5.3. Konwersja modulacji fazy na modulację amplitudy	295
9.6. Podsumowanie	297
Bibliografia rozdziału 9	297
10. Cyfrowe łącza optyczne	301
10.1. Wiadomości podstawowe	301
10.1.1. Wprowadzenie	301
10.1.2. Sygnał analogowy i cyfrowy	301
10.1.3. Twierdzenie Shannona-Hartleya	303
10.1.4. Klasyfikacja technik cyfrowej transmisji informacji	304
10.1.5. Podstawowa struktura łącza	306
10.2. Łącza z modulacją mocy i detekcją bezpośrednią (IM-DD)	307
10.2.1. Nadajnik łącza	307
10.2.2. Odbiornik łącza w systemach z detekcją bezpośrednią	310
10.2.3. Transmisja światłowodem – bilans mocy	316
10.2.4. Transmisja światłowodem – efekty dyspersji	319
10.2.5. Solitony	324
10.2.6. Łącza długiego dystansu	327
10.3. Łącza z wielostanową modulacją amplitudy i fazy	332
10.3.1. Więcej o formatach modulacji	332
10.3.2. Łącze z różnicową modulacją fazy DPSK i detekcją bezpośrednią	336
10.3.3. Nadajniki modulacji wielostanowej	339
10.3.4. Odbiorniki modulacji wielostanowej	342
10.3.5. Łącza z rozdziałem polaryzacji	344
10.4. Podsumowanie	347
Bibliografia rozdziału 10	348
11. Multipleksacja w łączach optycznych	351
11.1. Wprowadzenie	351
11.2. Multipleksacja z podziałem czasu	352
11.2.1. Multipleksacja z podziałem czasowym TDM	352
11.2.2. Optyczna multipleksacja z podziałem czasowym OTDM	354
11.3. Multipleksacja WDM z podziałem długości fali	357
11.3.1. Podstawowe zasady multipleksacji WDM	357
11.3.2. Układy multipleksacji i demultipleksacji	361
11.3.3. Filtry optyczne	367
11.3.4. Falowodowe siatki dyfrakcyjne	371
11.3.5. Systemy z laserem generującym grzebień częstotliwości	375
11.4. Multipleksacja SCM na podnośnych	378

11.4.1. Idea i właściwości multipleksacji na podnośnych	378
11.4.2. Systemy z multipleksacją SCM i WDM	380
11.5. Multipleksacja przestrzenna SDM	382
11.6. Podstawowe struktury sieci	384
11.7. Podsumowanie	386
Bibliografia rozdziału 11	388
12. Systemy radiowo-światłowodowe	391
12.1. Wprowadzenie	391
12.2. Architektura sieci radiowo-światłowodowej RoF	394
12.2.1. Zasady pracy systemów radiowo-światłowodowych	394
12.2.2. Łączy optyczne z modulacją mocy i detekcją bezpośrednią	397
12.2.3. Łączy optyczne z modulacją fazy i detekcją koherentną	398
12.3. Systemy radiowo-światłowodowe pasm milimetrycznych	400
12.3.1. Uwagi ogólne	400
12.3.2. Systemy z powielaniem częstotliwości nośnej	400
12.3.3. Generacja nośnej drogą mieszania sygnałów optycznych	402
12.4. Transmisja sygnałów mikrofalowych łączami RoF	404
12.4.1. Struktura łącz z modulacją bezpośrednią	404
12.4.2. Struktura łącz z modulacją zewnętrzną	407
12.4.3. Przykłady rozwiązań	408
12.5. Podsumowanie	412
Bibliografia rozdziału 12	413
13. Łączy optyczne wolnej przestrzeni	417
13.1. Wprowadzenie	417
13.2. Idea łącz optycznych wolnej przestrzeni	419
13.2.1. Układ łącz i jego elementy	419
13.2.2. Parametry wiązki promieniowania	420
13.2.3. Wzmocnienie anteny/soczewki	423
13.2.4. Jaką moc odbiera odbiornik	424
13.3. Łączy optyczne FSO Ziemia-Ziemia	425
13.3.1. Stosowane rozwiązania	425
13.3.2. Warunki propagacji w atmosferze	426
13.3.3. Łączy FSO w sieci	428
13.4. Komunikacja optyczna w przestrzeni	429
13.4.1. Specyfika łącz satelitarnych	429
13.4.2. Naprowadzanie, wykrywanie i śledzenie	432
13.4.3. Porównanie transmisji radiowej i optycznej	433
13.5. Komunikacja optyczna wewnątrz budynków	435
13.5.1. Uwagi ogólne	435
13.5.2. Systemy z szeroką wiązką	436
13.5.3. Systemy ze skupioną wiązką	439
13.6. Podsumowanie	440
Bibliografia rozdziału 13	441

14. Fotonika w mikrofalowych systemach antenowych	443
14.1. Wprowadzenie	443
14.2. Mikrofalowe anteny fazowane	444
14.2.1. <i>Struktura i działanie fazowanego szyku antenowego</i>	444
14.2.2. <i>Szyk antenowy jako odbiornik</i>	449
14.3. Fotonika w układach formowania wiązki	452
14.3.1. <i>Łącze optyczne jako prowadnica sygnału mikrofalowego</i>	452
14.3.2. <i>Optomikrofalowe przesuwniki fazy</i>	454
14.3.3. <i>Przełączane układy opóźniające</i>	457
14.3.4. <i>Układy TTD z rezonatorami pierścieniowymi</i>	458
14.3.5. <i>Układy TTD z liniami dyspersyjnymi</i>	461
14.3.6. <i>Układy formowania impulsów z siatkami Bragga</i>	466
14.4. Kierunki rozwoju	469
14.4.1. <i>Systemy wielowiązkowe i dwuwymiarowe</i>	469
14.4.2. <i>Cyfryzacja układów T/R</i>	470
14.5. Podsumowanie	471
Bibliografia rozdziału 14	472
Bibliografia książek i stron internetowych	475
O Autorze	477